

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **MONITORAMENTO DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO: ASPECTOS RELEVANTES PARA O DESENVOLVIMENTO DE NOVOS SISTEMAS CAPACITIVOS PARA OPERAÇÃO NAS CAMADAS SUBSUPERFICIAIS**

*Everton Alves Miranda <sup>1</sup>; Elias Fernandes de Sousa <sup>2</sup> & Vicente de Paulo Santos de Oliveira <sup>1</sup>*

**Abstract:** Soil is a material with a complicated structure, composed of solid particles, water, and air. It can vary widely in organic matter content, particle size, salinity, and porosity. The water present in soil plays an essential role in its chemical, physical, and mechanical properties. It influences plant growth, the organization of natural ecosystems, and biodiversity. This study aimed to analyze the needs and opportunities for improvement in systems designed to estimate soil water content and based on the principle of capacitance measurement. Increasing the operating frequency of the equipment used increases its accuracy. However, this strategy considerably increases its cost. Previous studies argue that it is possible to obtain significant improvements in soil moisture monitoring systems if frequencies in the range of 10 to 70 MHz are used. The current study suggests the possibility of developing cost-effective solutions based on excitation in the range of 1 to 40 MHz, starting with the use of microcontrollers. The testing and validation stages of the prototype are ongoing. Success in these steps will enable the generation of sufficiently accessible equipment, to the point of enabling the distribution of these sensors across a large area with high spatial density and in definitive installations, allowing the acquisition of data in real time from wireless network operation.

**Resumo:** O solo é um material com estrutura complicada, composto por partículas sólidas, água e ar. Este pode variar amplamente em conteúdo de matéria orgânica, tamanho das partículas, salinidade e porosidade. A água presente no solo desempenha um papel essencial nas suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. Ela influencia o crescimento das plantas, a organização dos ecossistemas naturais e a biodiversidade. O presente trabalho visou analisar as necessidades e oportunidades de melhoria nos sistemas destinados à estimativa do teor de água no solo e baseados no princípio da medição da capacitância. O aumento da frequência de operação do equipamento utilizado aumenta a sua acurácia. Entretanto, essa estratégia eleva consideravelmente o seu custo. Estudos anteriores defendem que é possível a obtenção de melhorias relevantes para os sistemas de monitoramento de umidade do solo, caso se utilize frequências na faixa de 10 a 70 MHz. O estudo atual sugere a possibilidade de desenvolvimento de soluções econômicas a partir de excitação na faixa de 1 até 40 MHz, tendo como ponto de partida a utilização de microcontroladores. As etapas de testes e validação do protótipo estão em curso. A obtenção de sucesso nessas etapas viabilizará a geração de equipamentos suficientemente acessíveis, ao ponto de viabilizar a distribuição desses sensores em uma grande área, com alta densidade espacial e instalação definitiva, permitindo a aquisição de dados em tempo real a partir da operação em rede sem fio.

**Palavras-Chave** – Umidade, Medição, Recursos Hídricos

1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Rua Dr. Siqueira, 273 - Parque Dom Bosco, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28030-130, Brasil, (22) 99983-9867, [eamirand@iff.edu.br](mailto:eamirand@iff.edu.br)

2) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Av. Alberto Lamego, 2000 - Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes - RJ, CEP: 28013-602

## INTRODUÇÃO

Considerando dados do IHP/UNESCO (*International Hydrological Programme* of UNESCO) publicados em 1998, de um volume total de 1.386 milhões km<sup>3</sup> de água existente no planeta, apenas 2,53% caracteriza-se como água doce. Dessa parcela, 68,9% está nas calotas polares e geleiras; 29,9% é água doce subterrânea e apenas 0,3% se encontra nos rios e lagos (Silva *et al.*, 2010).

A acumulação da água subterrânea ocorre pela infiltração de uma fração das precipitações, através do sistema intergranular dos sedimentos, onde o caminho de percolação das águas subterrâneas é estabelecido de acordo com a permeabilidade e a porosidade (Lamon, 2019; Silva *et al.*, 2010).

A água presente no solo desempenha um papel essencial nas suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. O crescimento das plantas, a organização dos ecossistemas naturais e a biodiversidade são consideravelmente afetados pela variação da quantidade de água do solo (Lekshmi *et al.*, 2014; Placidi *et al.*, 2020; Robinson *et al.*, 2008).

A medição do volume de água do solo ajuda a categorizar e contextualizar uma grande variedade de estudos que lidam com modelos e dados da superfície terrestre, com a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo e seus impactos na geração de escoamento, recarga de água subterrânea e transporte de soluto, bem como análises do perfil do solo para avaliação de modelos de absorção de água pelas raízes (Romano, 2014).

Segundo dados do Relatório da Conjuntura de Recursos Hídricos da ANA, em conformidade com dados da FAO e da ONU, o setor da agricultura é considerado como o responsável pela utilização da maior quantidade da água doce no mundo. Essa realidade é atribuída, principalmente, às práticas de irrigação (Mota, 2020; Talamone e Ferraz Jr, 2024). O conhecimento do teor de água nas camadas subsuperficiais do solo apresenta-se como um método rápido e eficiente para subsidiar a tomada de decisão nas atividades de gerenciamento dos sistemas de irrigação, de forma a promover a necessária redução na utilização dos recursos hídricos.

O objetivo desse trabalho é, mediante a um levantamento bibliográfico, identificar os requisitos importantes para o desenvolvimento de novos sistemas de medição de umidade nas camadas subsuperficiais do solo baseados na metodologia capacitiva, de forma a caracterizar os referidos sistemas como inovadores.

## MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia empregada para a obtenção dos dados utilizados na fundamentação teórica foi baseada em revisão bibliográfica, tendo como bases a Scopus, a *Web of Science* e o Google Acadêmico.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### Teor de água no solo e métodos para sua estimativa

O solo é um material composto por uma estrutura complicada de espaços porosos e partículas, podendo variar amplamente em conteúdo de matéria orgânica, tamanho e forma das partículas, salinidade e porosidade. Por isso, sua caracterização pode ser problemática (Campbell, 1990). Ele constitui-se em um sistema trifásico que consiste em partículas sólidas, água e ar. A fase sólida que forma o sistema de poros é chamada de matriz do solo (Hilhorst *et al.*, 2001). Na fase líquida, além da denominada água livre (encontrada nos espaços porosos e distantes da superfície das partículas), pode existir uma fração considerável de água na condição de água ligada, ou seja, fisicamente

adsorvida ou quimissorvida nas superfícies das partículas. A água ligada pode apresentar comportamento dielétrico marcadamente diferente da água livre (Campbell, 1990; Hilhorst *et al.*, 2001).

Existem diversos métodos para avaliação da umidade do solo. Entre eles, pode-se citar: método termogravimétrico, método tensiométrico, método da sonda de nêutrons, método de raios gama, sensoriamento remoto passivo ou ativo, radar de penetração no solo, condutividade térmica do solo, pulso de calor, condutividade elétrica, técnicas dielétricas (reflectometria no domínio do tempo, reflectometria no domínio da frequência e capacitância), entre outros. Comparativamente, cada um possui vantagens e desvantagem sobre os demais (Lekshmi *et al.*, 2014; Rasheed *et al.*, 2022; Robinson *et al.*, 2008; Romano, 2014; Yu *et al.*, 2021).

### **Métodos dielétricos para a inferência da umidade do solo**

Atualmente, a detecção da constante dielétrica do solo é considerada como o método mais eficaz e conveniente para medir a umidade do solo (Deng *et al.*, 2020), pois a constante dielétrica aparente é fortemente dependente do conteúdo volumétrico de água do solo (Topp *et al.*, 1980). Tendo em vista que a constante dielétrica de materiais mineralógicos comuns do solo (fração sólida) varia entre 2 a 14, enquanto a constante dielétrica da água é de aproximadamente 80, este método apresenta-se como um indicador potencialmente sensível para o volume de água no solo (Campbell, 1990; Topp *et al.*, 1980).

As medições por reflectometria no domínio do tempo (TDR) e por detecção de capacitância são os dois métodos principais para medir a umidade do solo continuamente em tempo real (Deng *et al.*, 2020). O TDR é amplamente reconhecido como um método confiável e com alta precisão. Ele é baseado na medição do tempo de viagem de pulsos elétricos ao longo de um guia de ondas para estimar a permissividade aparente do solo ( $\epsilon$ ), que está diretamente relacionada ao referido tempo de viagem (Kargas e Soulis, 2019). Nele são utilizados circuitos de alta frequência para medir as características do solo, fato que faz dele uma solução relativamente cara (Shirahama *et al.*, 2015). Devido ao seu custo, não são tão amplamente utilizados no campo agrícola (Deng *et al.*, 2020; Nagahage *et al.*, 2019; Shirahama *et al.*, 2015).

O alto custo da tecnologia TDR levou ao desenvolvimento de tecnologias alternativas de sensores dielétricos, que são mais baratos e não dependem de análises complicadas de forma de onda (Kargas e Soulis, 2019; Seyfried e Murdock, 2004). Os equipamentos baseados no método de detecção de capacitância operam em baixa frequência, são mais fáceis de fabricar e relativamente baratos, porém, essa vantagem de preço, traz consigo uma menor precisão de medição, gerando algumas limitações (Deng *et al.*, 2020; Robinson *et al.*, 2008; Shigeta *et al.*, 2018). Na maioria dos casos, faz-se necessária uma calibração específica para o tipo de solo a ser monitorado (Cruz *et al.*, 2020; Evett *et al.*, 2006; Nagahage *et al.*, 2019; Rêgo Segundo *et al.*, 2015; Seyfried e Murdock, 2004; Silva *et al.*, 2012).

O princípio de funcionamento de uma sonda de capacitância se baseia no uso do solo como um material “dielétrico”, ou seja, um material que tem a capacidade de armazenar energia quando um campo elétrico externo é aplicado. Um material dielétrico tem um arranjo de portadores de carga elétrica que podem ser deslocados por um campo elétrico ( $E$ ). As cargas se tornam polarizadas para compensar o campo elétrico de modo que as cargas positivas e negativas se movam em direções opostas. A constante dielétrica ( $k$ ) é equivalente à permissividade complexa aparente ( $\epsilon$ ). A parte real da permissividade ( $\epsilon'$ ) é uma medida de quanta energia de um campo elétrico externo é armazenada em um material. Já a parte imaginária da permissividade ( $\epsilon''$ ) é chamada de fator de perda e é uma medida de quão dissipativo um material é para um campo elétrico externo. O fator de perda inclui os efeitos da perda dielétrica e da condutividade (Agilent Technologies, 2006; Keysight Technologies,

2017; Placidi *et al.*, 2020). Não é possível fazer uma medição que possa separar completamente os fenômenos dielétricos dos de condução. Por isso, tudo o que pode ser medido é a quantidade total de energia armazenada ( $\epsilon'$ ) e a quantidade total de energia perdida ( $\epsilon''$ ) (Robinson *et al.*, 2008). Assim, a permissividade relativa complexa ( $\epsilon$ ) relaciona o deslocamento dielétrico (D) com a intensidade do campo elétrico (E), podendo ser descrita pela representação complexa:  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ , onde  $j^2 = -1$ . Essa equação compreende a parte real  $\epsilon'$  (comumente chamada de permissividade) e a parte imaginária  $\epsilon''$  (fator de perda) (Hilhorst *et al.*, 2001; Silva, 2008).

### **Impactos da frequência de operação nos sistemas de medição dielétricos**

As constantes dielétricas de muitos líquidos e sólidos dependem marcadamente da frequência de medição (Cole e Cole, 1941). O valor da constante dielétrica imaginária diminui rapidamente com o aumento da frequência, e de forma relativamente lenta com a diminuição do teor de água (Campbell, 1990). Os sensores que operam com frequência mais baixa são muito mais sensíveis a variação da condutividade elétrica ( $\sigma$ ) do que o sensor com frequência mais alta (Blonquist Jr. *et al.*, 2005; Jones *et al.*, 2005). Em baixas frequências, a constante dielétrica real aumenta monotonicamente com a diminuição da frequência. Por outro lado, em altas frequências, a permissividade efetiva de um solo é mais sensível ao seu conteúdo de água e menos a outros parâmetros, como a estrutura do solo (Campbell, 1990). Um ponto de atenção é que, quanto maior a frequência, maior é a perda de energia para os condutores devido à radiação eletromagnética (Chavanne *et al.*, 2010).

Campbell (1990) investigou a medição de umidade do solo na faixa de frequência de 1 a 50 MHz, enquanto Eller e Denoth (1996) mediram a função dielétrica de uma variedade de solos em uma faixa de frequência de 500 kHz até 95 MHz, e Kizito *et al.* (2008) investigaram na faixa de 5 a 150 MHz. A literatura relata avaliações de vários sensores (com diferentes custos de aquisição) em suas respectivas frequências de operação, a citar: Seyfried e Murdock (2004) abordaram a sonda Hydra, operando a 50 MHz; Kelleners *et al.* (2005) relatam sensores capacitivos operando entre 100 a 150 MHz; Blonquist Jr. *et al.* (2005) alisaram os sensores ECH2O Probe (50 MHz), CS616 (200 MHz), Hydra Probe (50 MHz) e Theta Probe (100 MHz); Evett *et al.* (2006) abordaram o sensor PR1/6, o qual opera em aproximadamente 100 MHz; Silva *et al.* (2012) testaram o modelo ML2x Theta probe, o qual opera a de 100 MHz; Kargas e Soulis (2019) abordaram o sensor ML2, operando a 100 MHz e o sensor WET, operando a 20 MHz; Adla *et al.* (2024) analisam a sonda Water Scout SM100, com oscilador operando a 80 MHz. Chavanne e Frangi (2017) abordaram a utilização de ponte auto balanceada em uma variação entre 1 e 32 MHz. Os relatos condizem tanto com a melhoria na qualidade da medição, como com o aumento de custo do equipamento, na medida em que a frequência de operação aumenta.

Uma alternativa econômica é o sensor de fabricação da empresa DFRobot, identificado por SKU:SEN0193. Conforme os trabalhos de Radi *et al.* (2018), Nagahage *et al.* (2019) e Placidi *et al.* (2020), o sensor opera a partir de um CMOS TL555I, emitindo uma frequência constante de aproximadamente 1,5 MHz. Conforme dados do fabricante, o TLC555 é um dispositivo de temporização de precisão, o qual pode ser usado a até 2,1 MHz (Texas Instruments Incorporated, 2023).

A relação custo-benefício dos sensores é refletida em seu desempenho de precisão, ou seja, o desempenho de precisão segue em grande parte os custos do sensor (Adla *et al.*, 2020). A maioria dos sensores de umidade do solo do tipo dielétrico buscam, através da operação em alta frequência, reduzir a influência da salinidade do solo, da textura e de outros fatores na medição. No entanto, essa solução aumenta o custo de produção do circuito de medição e não atende aos requisitos para implantação em larga escala de sensores na produção agrícola (Deng *et al.*, 2020).

## Aspectos relevantes para a melhoria dos sistemas de monitoramento de umidade do solo

A distribuição de umidade do solo em escala de campo exibe alta variabilidade espacial e temporal (Revil, 2013). Para a agricultura de precisão, a umidade do solo deve ser medida em vários locais e em várias profundidades (Kojima *et al.*, 2016). As redes de sensores sem fio são consideradas caras e requerem maior desenvolvimento, de forma a maximizar o número de nós sensores e gerar uma quantidade substancial de medições. Para isso, é essencial usar sensores de baixo custo com sinais que possam ser interpretados de forma direta e clara (Adla *et al.*, 2020; Syrový *et al.*, 2020) e que permitam instalação definitiva e em considerável densidade (Evelt *et al.*, 2006).

São necessários elementos sensores de baixo preço, com um nível apropriado de resposta. Produtos com boa relação custo-benefício, capazes de transferir dados diretamente para os agricultores por meio de redes baseadas em IoT (*Internet of Things*) sem fio, são consideravelmente necessários (Syrový *et al.*, 2020). Uma rede densa, combinando sensores capacitivos, poderia ajudar a caracterizar melhor a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo, o que pode potencialmente melhorar o gerenciamento da irrigação (Revil, 2013).

O interesse na redução dos custos observacionais gera a necessidade de se desenvolver novas estratégias para este objetivo, as quais são fundamentais para lidar com projetos de pesquisa atuais e futuros. Assim, o desenvolvimento de instrumentos de baixo custo torna-se um fator de grande importância (Aymerich *et al.*, 2014), desempenhando um papel fundamental nos estudos ambientais e representando um dos aspectos mais inovadores da pesquisa (Marcelli *et al.*, 2014a).

Conforme Murphy *et al.* (2015), a natureza de baixo custo de um dispositivo de monitoramento permite que vários sensores possam ser implantados em uma grande área, com alta densidade espacial. Alternativamente, os eventos detectados por uma rede desses sensores poderiam informar o momento de cada amostragem para a análise dos dados. Os sistemas de monitoramento devem ser econômicos, por isso é importante desenvolver tecnologias de observação que forneçam informações úteis, quantitativas e acessíveis (Cullen *et al.*, 1997).

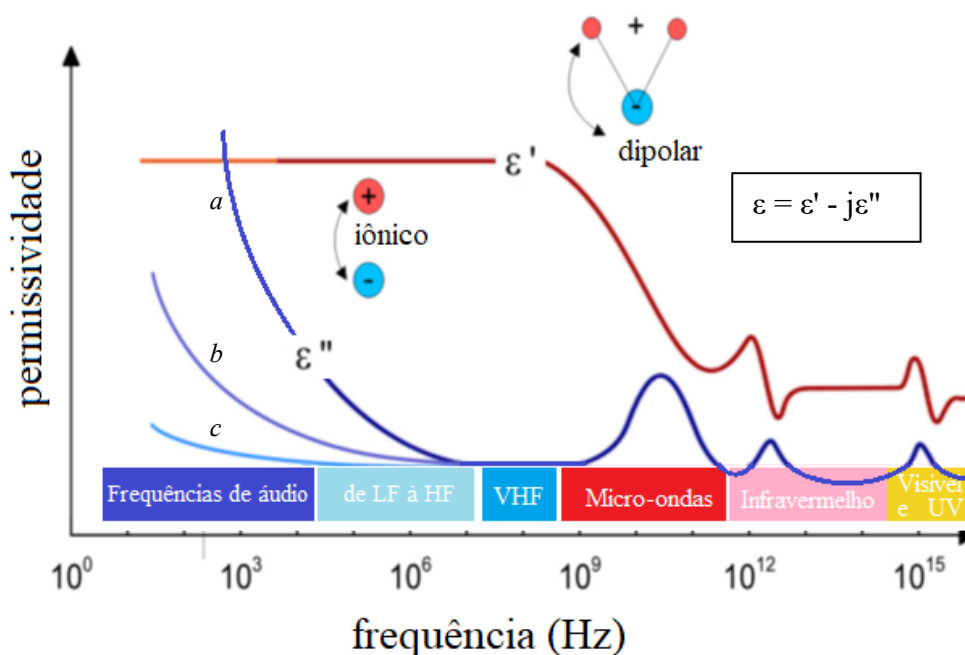
Conforme Konrad *et al.* (2016), um sistema de medição automatizado deve possuir como características: a aquisição de dados em tempo real, a facilidade de acesso aos dados, o design compacto e a facilidade de instalação e manuseio. Com isso, obtém-se a redução da possibilidade de erro humano nas leituras, assim como, dos custos potenciais associados às medições.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a detecção da constante dielétrica do solo como o método mais eficaz e conveniente para medir a umidade do solo e que os equipamentos baseados no método de detecção de capacitância são mais fáceis de fabricar e relativamente baratos (Deng *et al.*, 2020; Robinson *et al.*, 2008; Shigeta *et al.*, 2018), cabe discutir melhor o efeito da alteração de frequência de excitação no desempenho e custo dos sensores.

O gráfico apresentado na Figura 1 relaciona os valores das frequências de excitação (em escala logarítmica) com a permissividade apresentada pela água. As curvas apresentadas em tons mais intensos representam a relação “frequência x permissividade” para conteúdo de água com maiores valores de condutividade elétrica ( $\sigma$ ). É perceptível que, na medida que o valor da frequência de excitação é reduzido, a parcela imaginária da permissividade complexa ( $\epsilon''$ ) torna-se mais expressiva. Percebe-se também, que essa manifestação se intensifica ainda mais, na medida em que a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) se torna maior (curvas *a*, *b* e *c*), comprometendo a acurácia da medição.

Figura 1 – Relação entre os valores das frequências de excitação e da permissividade da água



Fonte: Adaptado de (Agilent Technologies, 2006; Keysight Technologies, 2017; Placidi *et al.*, 2020; Silva, 2008)

O Trabalho de Hilhost *et al.* (2001) relatou que quase não houve diminuição na permissividade do solo para frequências variando entre 10 MHz e 100 MHz, porém houve uma permissividade em declínio contínuo para frequências maiores que 100 MHz. Partindo disso, o autor defende que o uso de frequências acima de 10 MHz seja uma alternativa realista.

Chavanne e Frangi (2014) defendem que uma frequência operacional abaixo de 100 MHz, porém maior que 10 MHz é interessante para desenvolvimento de sensores capacitivos. Kizito *et al.* (2008) defendem que, como a mudança para frequências mais altas é concomitante com o aumento do gasto com eletrônicos, embora outros estudos tenham sugerido que frequências de medição mais altas são atraentes para mitigar os efeitos do tipo de solo, temperatura e condutividade elétrica, existe uma melhoria significativa no nível de 70 MHz.

Tendo em vista que o aumento na frequência de excitação leva a melhoria de desempenho, porém acarreta a elevação de custo construtivo a valores que reduzem a viabilidade econômica da implementação (Adla *et al.*, 2020; Deng *et al.*, 2020; Nagahage *et al.*, 2019; Shirahama *et al.*, 2015), entende-se que o fator essencial para a evolução dos sensores, de forma que seja possível atender a adequada distribuição espacial, em variadas profundidades e com instalações definitivas, conforme preconizado por Revil (2013), Kojima *et al.* (2016), Adla *et al.* (2020) e Evett *et al.* (2006), está no desenvolvimento de recursos eletrônicos que reduzam a complexidade e o custo para operação específica nas frequências de excitação entre 10 e 70 MHz.

O estudo dos microcontroladores atualmente disponíveis no mercado, em especial os da família ESP32, sugerem que é possível a geração de soluções econômicas e relativamente simples, operando na faixa de excitação de 1 até 40 MHz. Essa possibilidade, após adequadamente verificada e evidenciada, será capaz de agregar as características de aquisição de dados em tempo real e design compacto, conforme preconizado por Adla *et al.* (2020), Cullen *et al.* (1997) e Konrad *et al.* (2016), assim como a adequada redução dos custos (Aymerich *et al.*, 2014; Cullen *et al.*, 1997; Marcelli *et al.*, 2014b), viabilizando assim, a distribuição dos sensores em uma grande área, com alta densidade

espacial e com instalações definitivas (Evelt *et al.*, 2006; Kojima *et al.*, 2016; Murphy *et al.*, 2015; Revil, 2013; Syrový *et al.*, 2020) e operando em rede sem fio conforme preconizado por Revil (2013) e Syrový *et al.* (2020).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou um panorama sobre a estimativa do teor de água no solo, enfatizando os métodos baseados na detecção da constante dielétrica do solo, com foco especial nos sensores que operam pelo princípio da medição da capacitância.

A constante dielétrica do solo é equivalente à permissividade complexa aparente ( $\epsilon$ ). Essa, por sua vez, é constituída por uma parcela real ( $\epsilon'$ ), a qual se refere a medida da energia armazenada no solo, e por uma parcela imaginária ( $\epsilon''$ ), relacionada ao fator de perda, o qual depende de quanto dissipativo o solo é para um campo elétrico externo.

O aumento da frequência de operação do equipamento aumenta sua acurácia na medição da permissividade do solo. Essa maior frequência minimiza os efeitos oriundos de variações em parâmetros diferentes do teor de água. Entretanto, essa estratégia eleva consideravelmente o custo do equipamento. Estudos anteriores defendem que é possível a obtenção de melhorias relevantes para os sistemas de monitoramento de umidade do solo, caso se utilize frequências na faixa de 10 a 70 MHz. O estudo atual sugere a possibilidade de desenvolvimento de soluções econômicas a partir de excitação na faixa de 1 até 40 MHz, tendo como ponto de partida, a utilização de microcontroladores da família ESP32. As etapas de testes e validação do protótipo estão em curso. A obtenção de sucesso nessas etapas viabilizará a geração de equipamentos sensores suficientemente acessíveis, ao ponto de viabilizar a distribuição dos sensores em uma grande área, com alta densidade espacial e instalação definitiva, permitindo a aquisição de dados em tempo real a partir de sua operação em rede sem fio.

## REFERÊNCIAS

- ADLA, Soham *et al.* Laboratory Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Capacitive and Very Low-Cost Resistive Soil Moisture Sensors. **Sensors**, v. 20, n. 2, p. 363, jan. 2020.
- ADLA, Soham *et al.* Impact of calibrating a low-cost capacitance-based soil moisture sensor on AquaCrop model performance. **Journal of Environmental Management**, v. 353, p. 120248, 27 fev. 2024.
- AGILENT TECHNOLOGIES. **Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials - Application Note**. Agilent Technologies, , 26 jun. 2006. Disponível em: <[http://academy.cba.mit.edu/classes/input\\_devices/meas.pdf](http://academy.cba.mit.edu/classes/input_devices/meas.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2024
- AYMERICH, Ismael F. *et al.* Analysis of discrimination techniques for low-cost narrow-band spectrofluorometers. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 15, n. 1, p. 611–634, 30 dez. 2014.
- BLONQUIST JR., J. M.; JONES, S. B.; ROBINSON, D. A. Standardizing Characterization of Electromagnetic Water Content Sensors: Part 2. Evaluation of Seven Sensing Systems. **Vadose Zone Journal**, v. 4, n. 4, p. 1059–1069, 2005.
- CAMPBELL, Jeffrey E. Dielectric Properties and Influence of Conductivity in Soils at One to Fifty Megahertz. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 2, p. 332–341, 1990.
- CHAVANNE, Xavier; FRANGI, Jean-Pierre. Presentation of a Complex Permittivity-Meter with Applications for Sensing the Moisture and Salinity of a Porous Media. **Sensors**, v. 14, n. 9, p. 15815–15835, 26 ago. 2014.

- CHAVANNE, Xavier; FRANGI, Jean-Pierre. Autonomous Sensors for Measuring Continuously the Moisture and Salinity of a Porous Medium. **Sensors**, v. 17, n. 5, p. 1094, 11 maio 2017.
- CHAVANNE, Xavier; FRANGI, Jean-Pierre; ROSNY, Gilles de. A New Device for *In Situ* Measurement of an Impedance Profile at 1–20 MHz. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 59, n. 7, p. 1850–1859, jul. 2010.
- COLE, Kenneth S.; COLE, Robert H. Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. **The Journal of Chemical Physics**, v. 9, n. 4, p. 341–351, 1 abr. 1941.
- CRUZ, Pedro Gomes Da *et al.* Calibração de sonda de capacitância em latossolo vermelho-amarelo. **Agrometeoros**, v. 26, n. 2, 3 mar. 2020.
- CULLEN, John J. *et al.* Optical detection and assessment of algal blooms. **Limnology and Oceanography**, v. 42, n. 5part2, p. 1223–1239, jul. 1997.
- DENG, Xiao *et al.* A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance. **Measurement**, v. 150, p. 107052, 1 jan. 2020.
- ELLER, H.; DENOTH, A. A capacitive soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 185, n. 1, p. 137–146, 1 nov. 1996.
- EVETT, Steven R.; TOLK, Judy A.; HOWELL, Terry A. Soil Profile Water Content Determination: Sensor Accuracy, Axial Response, Calibration, Temperature Dependence, and Precision. **Vadose Zone Journal**, v. 5, n. 3, p. 894–907, 2006.
- HILHORST, M. A. *et al.* Dielectric Relaxation of Bound Water versus Soil Matric Pressure. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 2, p. 311–314, mar. 2001.
- JONES, S. B. *et al.* Standardizing Characterization of Electromagnetic Water Content Sensors: Part 1. Methodology. **Vadose Zone Journal**, v. 4, n. 4, p. 1048–1058, 2005.
- KARGAS, George; SOULIS, Konstantinos X. Performance evaluation of a recently developed soil water content, dielectric permittivity, and bulk electrical conductivity electromagnetic sensor. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 568–579, 1 mar. 2019.
- KELLENERS, T. J. *et al.* Frequency Dependence of the Complex Permittivity and Its Impact on Dielectric Sensor Calibration in Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 1, p. 67–76, 2005.
- KEYSIGHT TECHNOLOGIES. **Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials: Application Note**. Keysight Technologies, , 7 mar. 2017. Disponível em: <[https://www.cmc.ca/wp-content/uploads/2019/08/Basics\\_Of\\_MeasuringDielectrics\\_5989-2589EN.pdf](https://www.cmc.ca/wp-content/uploads/2019/08/Basics_Of_MeasuringDielectrics_5989-2589EN.pdf)>. Acesso em: 20 set. 2024
- KIZITO, F. *et al.* Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 3, p. 367–378, 15 maio 2008.
- KOJIMA, Yuki *et al.* Low-Cost Soil Moisture Profile Probe Using Thin-Film Capacitors and a Capacitive Touch Sensor. **Sensors**, v. 16, n. 8, p. 1292, 15 ago. 2016.
- KONRAD, Odorico *et al.* Enhancing the analytical capacity for biogas development in Brazil: assessment of an original measurement system for low biogas flow rates out of agricultural biomass residues. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 5, p. 792–798, out. 2016.
- LAMON, Geraldo P. S. **Água Superficial E Subterrânea**. , 2019. Disponível em: <<https://www.revistatae.com.br/Artigo/166/agua-superficial-e-subterranea>>. Acesso em: 9 jan. 2025

- LEKSHMI, S. U. Susha; SINGH, D. N.; BAGHINI, Maryam Shojaei. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v. 54, p. 92–105, ago. 2014.
- MARCELLI, Marco *et al.* Design and Application of New Low-Cost Instruments for Marine Environmental Research. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 14, n. 12, p. 23348–23364, 5 dez. 2014a.
- MARCELLI, Marco *et al.* Design and Application of New Low-Cost Instruments for Marine Environmental Research. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 14, n. 12, p. 23348–23364, 5 dez. 2014b.
- MOTA, Mika. **Gestão da água na agricultura**. , set. 2020. Disponível em: <<https://digitalagro.com.br/2020/09/02/gestao-da-agua-na-agricultura/>>. Acesso em: 9 jan. 2025
- MURPHY, Kevin *et al.* A low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring. **Talanta**, v. 132, p. 520–527, 15 jan. 2015.
- NAGAHAGE, Ekanayaka Achchillage Ayesha Dilrukshi; NAGAHAGE, Isura Sumeda Priyadarshana; FUJINO, Takeshi. Calibration and Validation of a Low-Cost Capacitive Moisture Sensor to Integrate the Automated Soil Moisture Monitoring System. **Agriculture**, v. 9, n. 7, p. 141, jul. 2019.
- PLACIDI, Pisana *et al.* Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks. **Sensors**, v. 20, n. 12, p. 3585, jan. 2020.
- RADI *et al.* Calibration of Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU:SEN0193). In: 2018 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (ICST). **2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)**. ago. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICSTC.2018.8528624>>. Acesso em: 25 set. 2024
- RASHEED, Muhammad Waseem *et al.* Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11538, 14 set. 2022.
- RÊGO SEGUNDO, Alan Kardek *et al.* A Novel Low-Cost Instrumentation System for Measuring the Water Content and Apparent Electrical Conductivity of Soils. **Sensors**, v. 15, n. 10, p. 25546–25563, out. 2015.
- REVIL, A. Effective conductivity and permittivity of unsaturated porous materials in the frequency range 1 mHz–1GHz. **Water Resources Research**, v. 49, n. 1, p. 306–327, jan. 2013.
- ROBINSON, D. A. *et al.* Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 1, p. 358–389, fev. 2008.
- ROMANO, Nunzio. Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. **Journal of Hydrology**, Determination of soil moisture: Measurements and theoretical approaches. v. 516, p. 6–20, 4 ago. 2014.
- SEYFRIED, Mark S.; MURDOCK, Mark D. Measurement of Soil Water Content with a 50-MHz Soil Dielectric Sensor. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 2, p. 394–403, mar. 2004.
- SHIGETA, Ryo *et al.* Capacitive-Touch-Based Soil Monitoring Device with Exchangeable Sensor Probe. In: 2018 IEEE SENSORS. **2018 IEEE SENSORS**. out. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICSENS.2018.8589698>>. Acesso em: 2 out. 2024
- SHIRAHAMA, Yasutomo *et al.* Implementation of wide range soil moisture profile probe by coplanar plate capacitor on film substrate. In: 2015 IEEE SENSORS. **2015 IEEE SENSORS**. nov. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICSENS.2015.7370633>>. Acesso em: 1 out. 2024

- SILVA, Bruno Montoani *et al.* Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 277–286, fev. 2012.
- SILVA, Antonio Joaquim da *et al.* Poços Jorrantes do Vale do Rio Gurguéia (Pi): Caracterização de um Espaço Marcado pelo Desperdício Hídrico. *In: Gestão dos Recursos Hídricos e Planejamento Ambiental*. João Pessoa – PB: Editora Universitária da UFPB, 2010. p. 559.
- SILVA, Marco Jose da. **Impedance sensors for fast multiphase flow measurement and imaging**. Dresden: TUDpress, Verl. der Wiss, 2008.
- SYROVÝ, Tomáš *et al.* Fully Printed Disposable IoT Soil Moisture Sensors for Precision Agriculture. **Chemosensors**, v. 8, n. 4, p. 125, dez. 2020.
- TALAMONE, Rose; FERRAZ JR. **Setor agrícola utiliza metade da água consumida no Brasil**. , mar. 2024. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/?p=735674>>. Acesso em: 9 jan. 2025
- TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. **TLC555 LinCMOS™ Technology Timer**. TI.com, , nov. 2023. Disponível em: <<https://www.ti.com/product/TLC555>>. Acesso em: 16 nov. 2024
- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 574–582, 1980.
- YU, Limin *et al.* Review of research progress on soil moisture sensor technology. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 14, n. 3, p. 32–42, 2021.